

(12) 按照专利合作条约所公布的国际申请

(19) 世界知识产权组织
国际局

(43) 国际公布日
2024 年 6 月 13 日 (13.06.2024)



(10) 国际公布号
WO 2024/119366 A1

- (51) 国际专利分类号:
G06F 17/00 (2019.01) **G01S 11/14** (2006.01)
- (21) 国际申请号: PCT/CN2022/136882
- (22) 国际申请日: 2022 年 12 月 6 日 (06.12.2022)
- (25) 申请语言: 中文
- (26) 公布语言: 中文
- (71) 申请人: 浙江大学 (**ZHEJIANG UNIVERSITY**) [CN/CN]; 中国浙江省杭州市西湖区余杭塘路 866 号, Zhejiang 310058 (CN)。
- (72) 发明人: 曹春晓 (**CAO, Chunxiao**); 中国浙江省杭州市西湖区余杭塘路 866 号, Zhejiang 310058 (CN)。 任重 (**REN, Zhong**); 中国浙江省杭州市西湖区余杭塘路 866 号, Zhejiang 310058 (CN)。 安自立 (**AN, Zili**); 中国浙江省杭州市西湖区余杭塘路 866 号, Zhejiang 310058 (CN)。 周昆 (**ZHOU, Kun**); 中国浙江省杭州市西湖区余杭塘路 866 号, Zhejiang 310058 (CN)。
- (74) 代理人: 杭州求是专利事务所有限公司 (**HANGZHOU QIUSHI PATENT OFFICE CO., LTD.**); 中国浙江省杭州市西湖区古墩路 701 号绿城紫金广场 C 座 1506 室, Zhejiang 310014 (CN)。
- (81) 指定国(除另有指明, 要求每一种可提供的国家保护): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CV, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IQ, IR, IS, IT, JM, JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ,

LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, WS, ZA, ZM, ZW。

- (84) 指定国(除另有指明, 要求每一种可提供的地区保护): ARIPO (BW, CV, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SC, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), 欧亚 (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), 欧洲 (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, ME, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG)。

本国际公布:

- 包括国际检索报告(条约第 21 条(3))。

(54) **Title:** METHOD FOR CALCULATING OF SOUND WAVE DIFFRACTION AT STRAIGHT EDGE BASED ON PATH TRACKING

(54) 发明名称: 一种基于路径跟踪的声波直边衍射计算方法

(57) **Abstract:** Disclosed is a calculation method for diffraction of a sound wave at a straight edge, based on path tracking. The present method expresses diffraction at a convex straight edge as the integral of a radial function on a geometric straight edge, and the integral is calculated using a path tracking method, thereby achieving efficient calculation of diffraction at a straight edge under a path tracking framework. In addition, the diffraction calculation method of the present invention provides a series of matched optimization technologies, so as to improve the quality of a calculation result, and reduce resource consumption of a calculation result. Experimental results show that the result of the method of the present invention in a simple scene is consistent with the accurate solution for diffraction at a convex straight edge, and in a large complex scene, the method can provide a diffraction simulation result for a user at nearly real-time speeds.

(57) 摘要: 本发明公开了一种基于路径跟踪的声波直边衍射的计算方法。该方法将凸直边衍射表示为几何体直边上径向函数的积分, 并使用路径跟踪方法计算该积分, 从而实现了路径跟踪框架下的高效直边衍射计算。此外, 本发明针对上述衍射计算方法提出了一系列配套的优化技术, 以提高计算结果的质量, 减少计算结果的资源消耗。实验结果表明, 本发明的方法在简单场景下的结果与凸直边衍射的精确解相符, 在大型复杂场景下, 该方法可以接近实时的速度向用户提供衍射模拟结果。



WO 2024/119366 A1

一种基于路径跟踪的声波直边衍射计算方法

技术领域

本发明涉及声学模拟技术领域，尤其涉及一种基于路径跟踪的声波直边衍射计算方法。

背景技术

声传播模拟技术在建筑设计和虚拟现实等领域中有广泛的应用。在声传播模拟算法中，基于几何声学的方法由于计算效率较高，在实际应用中较为常见。几何声学方法对波动方程进行简化近似，假设声波沿直线传播。这种简化使得衍射，干涉等现象需要独立处理。衍射成分的缺乏使得听者进入物体遮挡的“阴影”区域时，声传播模拟结果会出现明显的不连续现象，与日常声学体验不符，极大降低了模拟结果的真实感。

将衍射现象置入几何声学的框架是一件复杂的事情。实际工程一般会在使用普通几何声学理论计算出的冲激响应之上，另外叠加一个表示衍射的冲激响应。这里表示衍射的冲激响应可使用波动方程算出。但在更多的情况下，希望衍射的计算和普通几何方法相近。一种自然的想法是先场景将场景拆分成一些较简单，容易计算衍射的结构，之后将计算结果拼起来，构成最终的衍射解。一般使用三角网格表示场景中的物体，而物体遮挡产生的阴影边界和三角网格中的边有关，因此，可以尝试计算三角网格各条边附近的衍射。这就是几何声学关心直边衍射表示的动机。

直边衍射，或尖劈衍射，指由一条直边相连的，成一定夹角的两无限大半平面附近的衍射。上世纪中，Keller 首先提出了一种在几何光学中表述凸直边衍射的方法，称为几何绕射理论。Keller 的结果在大多数方向上接近精确解，但在“阴影边界”，即几何光学解的不连续处附近，这一模型是失效的。之后，另一些人对 GTD 做出改进，解决了其在阴影边界附近不连续的问题，改进后的新理论称作一致性几何绕射理论，具体可参考 MCNAMARA D A, PISTORIUS C W I, MALHERBE J A G. Introduction to the Uniform Geometrical Theory of Diffraction[M]. Artech House, 1990。另一种对直边衍射的表达尝试始于 Biot-Tolstoy 解。其给出了球面波射入凸二面角时回波的解析形式。在将 Biot-Tolstoy 解应用于声学研究时，Medwin 基于波动方程惠更斯原理的直觉，将回波分解为以直边上各点为中心的一系列径向函数的组合，并发现这一拆分有助于解释有限长直边的衍射问题。结合 Biot-Tolstoy 解和 Medwin 分解，便可得到另一种直边衍射的描述模型，称为 Biot-Tolstoy-Medwin (BTM) 模型，具体可参考 SVENSSON U P, FRED R I, VANDERKOOY J. An analytic secondary source

model of edge diffraction impulse responses[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 1999, 106: 2331-2344。

UTD 和 BTM 是声传播模拟中最为常见的两种几何衍射模型。UTD（一致性几何绕射理论）模型由于出现较早，其相关研究非常丰富。对于平面和球面入射波，理想半平面或曲半平面，各种不同边界条件等情况，都可以找到相关的研究文章。然而，UTD 的构建过程中使用了基尔霍夫近似，且假设直边长度无限。因此在实际应用中，UTD 的结果与精确解必然有差异。此外，UTD 解的表示并非如一般冲激响应一样位于时域上，而是位于频域上。这使得它和几何声传播模拟器的其它部分难以配合。通常的应用往往只会选取 UTD 解数个频率点上的结果，并丢掉全部相位信息。这使得 UTD 应用于实际声传播模拟器时的误差远大于理论误差。UTD 模型所依赖的 Biot-Tolstoy 解是无限长直边衍射问题的解析解，Medwin 分解也并非近似。因此，BTM 方法理论上可达到的精确程度比 UTD 要高。此外，由于 Medwin 分解将直边分解为一系列径向函数，BTM 方法还可以处理分段直边，甚至曲线边的衍射问题。BTM 不及 UTD 的方面在于其相关研究资料较少，且在现有声传播模拟器中的实现不如 UTD 有效率。

UTD 和 BTM 在声传播模拟中均有广泛的应用。本世纪初便有文章在声学虚拟现实系统中实现了基于 UTD 的单次衍射，后来的研究者很快将其推广至高次衍射的情况。对于较复杂场景，也存在快速寻找可行衍射路径的方法，但需要对场景进行预先简化，直接使用原始的 BTM 表达式进行声传播模拟，但其计算效率过低，仅适合小规模场景的离线计算。也有以 BTM 为基础，计算常见几何体的衍射解，并使用这些解去近似实际环境中的物体。如体积衍射及传播法。

除 UTD 和 BTM 外，还有一些并未流行开来的衍射模型。一些方法使用海森堡不确定性原理解释声波衍射，使用衍射角概率密度函数描述衍射波沿非直线传播的特性。这种方法缺少物理基础，也难以保证结果的正确性；近来提出的方向性线源模型是一个有潜力的模型。它使用少量的近似解释了大量不同情况下的直边衍射，参考 MENOUNOU P, NIKOLAOU P. Analytical model for predicting edge diffraction in the time domain. [J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2017, 142 6: 3580。但目前 DLSSM 在实际声传播模拟器中的应用还没有出现。

因此，我们亟需一种几何框架下，大规模场景中计算高精度直边衍射的解决方案。

发明内容

本发明的目的在于针对现有技术的不足，提供一种基于路径跟踪的声波衍射现象模拟方法。

本发明是通过以下技术方案来实现的：

一种基于路径跟踪的声波直边衍射计算方法，包括如下步骤：

(1) 读取与衍射相关的声学环境状态，所述声学环境状态包括声源与听者位置、场景几何描述、以及几何体表面的介面特征；

(2) 在场景中随机生成大量衍射路径，所述路径由场景中一系列节点与连接节点的线段构成，路径的起始节点为声源，末尾节点为听者，其余中间节点位于场景中几何体的凸直边上；除各构成路径的节点外，路径的其它部分与场景中的几何体表面不相交；

(3) 计算每一路径的最终贡献，设有路径包含 $n+1$ 个节点，各节点从声源到听者依次编号为 $\mathbf{x}_0$ 到 $\mathbf{x}_n$ ，记节点之间线段为 $\mathbf{x}_i \rightarrow \mathbf{x}_{i+1}$ ，完整路径为 $\mathbf{x}_0 \rightarrow \mathbf{x}_1 \rightarrow \dots \rightarrow \mathbf{x}_n$ ，则总贡献 $f(\mathbf{x}_0 \rightarrow \mathbf{x}_1 \rightarrow \dots \rightarrow \mathbf{x}_n)$ 计算公式如下：

$$f(\mathbf{x}_0 \rightarrow \mathbf{x}_1 \rightarrow \dots \rightarrow \mathbf{x}_n) = L_0(\mathbf{x}_0 \rightarrow \mathbf{x}_1) \cdot \prod_{i=0}^{n-1} M(\mathbf{x}_i \rightarrow \mathbf{x}_{i+1}) \prod_{i=1}^{n-1} \rho(\mathbf{x}_{i-1} \rightarrow \mathbf{x}_i \rightarrow \mathbf{x}_{i+1})$$

其中， $L_0(\mathbf{x}_0 \rightarrow \mathbf{x}_1)$ 为声源特性， $M(\mathbf{x}_i \rightarrow \mathbf{x}_{i+1})$ 为 $\mathbf{x}_i \rightarrow \mathbf{x}_{i+1}$ 处的声介质特性， $\rho(\mathbf{x}_{i-1} \rightarrow \mathbf{x}_i \rightarrow \mathbf{x}_{i+1})$ 为 $\mathbf{x}_i$ 处直边衍射的径向函数表示；

(4) 将所有路径累加的贡献至冲激响应函数：对于路径 $\mathbf{x}_0 \rightarrow \mathbf{x}_1 \rightarrow \dots \rightarrow \mathbf{x}_n$ ，已知其贡献为步骤 (3) 中的 $f(\mathbf{x}_0 \rightarrow \mathbf{x}_1 \rightarrow \dots \rightarrow \mathbf{x}_n)$ ，并记其生成概率为 $p(\mathbf{x}_0 \rightarrow \mathbf{x}_1 \rightarrow \dots \rightarrow \mathbf{x}_n)$ ，传播延迟为 t_s ，则在原有冲激响应函数之上累加 $\delta(x - t_s) \cdot \frac{f(\mathbf{x}_0 \rightarrow \mathbf{x}_1 \rightarrow \dots \rightarrow \mathbf{x}_n)}{p(\mathbf{x}_0 \rightarrow \mathbf{x}_1 \rightarrow \dots \rightarrow \mathbf{x}_n)}$ ，其中 $\delta(x)$ 为单位冲激函数；

(5) 输出步骤 (4) 产生的冲激响应函数作为衍射模拟结果。

具体地，所述步骤 (2) 包括如下子步骤：

(2.1) 初始化路径，使其包含的唯一节点为路径起点；

(2.2) 设当前路径状态为 $\mathbf{x}_0 \rightarrow \mathbf{x}_1 \rightarrow \dots \rightarrow \mathbf{x}_n$ ，从 $\mathbf{x}_n$ 出发随机射出一条射线；若 $\mathbf{x}_n$ 不是路径起点，则使用与直边衍射径向函数相匹配的采样函数决定射线的出射角度；

(2.3) 记射线与场景几何表面的首个交点为 $\mathbf{x}_{n+1}^F$ ，并称其为伪交点；若该点不存在，则求交失败，转到步骤 (2.8)；

(2.4) 在步骤 (2.3) 中伪交点 $\mathbf{x}_{n+1}^F$ 所在三角面的三条边中随机选择一条；设三角面为 $\triangle abc$ ，被选择的边为 ab ，该边所对的顶点为 c ，则用直线连接 c 与 $\mathbf{x}_{n+1}^F$ 并延长，与 ab 交于一

点, 记为 $\mathbf{x}_{n+1}$, 称为交点;

(2.5) 若步骤 (2.4) 中的边 ab 不是凸直边, 或者线段 $\mathbf{x}_n \rightarrow \mathbf{x}_{n+1}$ 在两端点以外的地方与场景几何相交, 则求交失败, 转到步骤 (2.8); 否则将交点 $\mathbf{x}_{n+1}$ 作为节点添加至路径 $\mathbf{x}_0 \rightarrow \mathbf{x}_1 \rightarrow \dots \rightarrow \mathbf{x}_n$ 末尾, 构成新的路径 $\mathbf{x}_0 \rightarrow \mathbf{x}_1 \rightarrow \dots \rightarrow \mathbf{x}_{n+1}$;

(2.6) 计算路径 $\mathbf{x}_0 \rightarrow \mathbf{x}_1 \rightarrow \dots \rightarrow \mathbf{x}_{n+1}$ 的生成概率: 若已知路径 $\mathbf{x}_0 \rightarrow \mathbf{x}_1 \rightarrow \dots \rightarrow \mathbf{x}_n$ 的生成概率为 $p(\mathbf{x}_0 \rightarrow \mathbf{x}_1 \rightarrow \dots \rightarrow \mathbf{x}_n)$, 则路径 $\mathbf{x}_0 \rightarrow \mathbf{x}_1 \rightarrow \dots \rightarrow \mathbf{x}_{n+1}$ 的生成概率计算方法为

$$p(\mathbf{x}_0 \rightarrow \mathbf{x}_1 \rightarrow \dots \rightarrow \mathbf{x}_{n+1}) = p(\mathbf{x}_0 \rightarrow \mathbf{x}_1 \rightarrow \dots \rightarrow \mathbf{x}_n) \cdot p_V(\mathbf{x}_{n-1} \rightarrow \mathbf{x}_n \rightarrow \mathbf{x}_{n+1}^F) p_E(\mathbf{x}_n \rightarrow \mathbf{x}_{n+1}^F) p_C(\mathbf{x}_n \rightarrow \mathbf{x}_{n+1})$$

其中, $p_V(\mathbf{x}_{n-1} \rightarrow \mathbf{x}_n \rightarrow \mathbf{x}_{n+1}^F)$ 为 $\mathbf{x}_n$ 处入射路径方向为 $\mathbf{x}_{n-1} \rightarrow \mathbf{x}_n$ 时, 生成出射射线方向为 $\mathbf{x}_n \rightarrow \mathbf{x}_{n+1}^F$ 的概率, 若 $n=0$, 则须将这一项替换为射线源出射射线方向为 $\mathbf{x}_n \rightarrow \mathbf{x}_{n+1}^F$ 的概率;

$p_E(\mathbf{x}_n \rightarrow \mathbf{x}_{n+1}^F)$ 为射线 $\mathbf{x}_n \rightarrow \mathbf{x}_{n+1}^F$ 与场景几何交于 $\mathbf{x}_{n+1}^F$ 的概率; $p_C(\mathbf{x}_n \rightarrow \mathbf{x}_{n+1})$ 为概率修正项;

(2.7) 若路径长度未满足用户要求, 则转到步骤 (2.2);

(2.8) 将当前路径作为场景中的衍射路径。

进一步地, 所述步骤 (2) 中, 从声源和听者两端同时生成路径, 从声源出发的路径称为前向子路径, 从听者出发的路径称为后向子路径; 之后, 在前后向子路径的节点之间随机建立连接, 以构成从声源到听者的完整路径; 设前向子路径从声源到被连接处的部分生成概率为 p_F , 后向子路径从听者到被连接处的部分的生成概率为 p_B , 建立连接的概率为 p_L , 则完整路径的生成概率为 $p_F \cdot p_B \cdot p_L$ 。

进一步地, 所述步骤 (5) 中, 路径的贡献需乘以一用于抑制极端值的因子 C_s :

$$C_s = \frac{C_o^* \cdot (1 - e^{-2C_o/C_o^*})}{C_o \cdot (1 + e^{-2C_o/C_o^*})}$$

其中 C_o^* 为一由用户定义的变量, C_o 为路径中随机生成的各段对应的 C_o 之积, 每一路径段的 C_o 为衡量包含该路径段的路径产生极端值的可能性的一参数。

进一步地, 所述步骤 (3) 中, 计算贡献需除以正反向路径连接节点对应位置的 $[F_{j,i}]$ 中元素之积; 所述 $[F_{j,i}]$ 为一个 M 行 N 列的数组, 其中 N 为前向与后向路径的最大节点数; 所

述路径的节点存储于一个行列数相同的数组当中，其中的每一行对应一条单独的路径，令数组 $[F_{j,i}]$ 第一列各元素为1，节点数组第一列为路径起点；在第 $i-1$ 列节点已经生成的情况下，数组中的第 i 列节点的生成过程包括如下子步骤：

(5.1) 从节点数组每一行的第 $i-1$ 个节点 $\mathbf{x}_{i-2}$ 出发，随机射出一条射线；若 $i > 1$ ，则使用与直边衍射径向函数相匹配的采样函数决定射线的出射角度；

(5.2) 记射线与场景几何表面的首个交点为 $\mathbf{x}_{i-1}^F$ ，并称其为伪交点；若该点不存在，则求交失败，转到步骤(5.7)；

(5.3) 在步骤(5.2)中伪交点 $\mathbf{x}_{i-1}^F$ 所在三角面的三条边中随机选择一条；设三角面为 $\triangle abc$ ，被选择的边为 ab ，该边所对的顶点为 c ，则用直线连接 c 与 $\mathbf{x}_{i-1}^F$ 并延长，与 ab 交于一点，记为 $\mathbf{x}_{i-1}$ ，称为交点；

(5.4) 若步骤(5.3)中的边 ab 非凸直边，或者线段 $\mathbf{x}_{i-2} \rightarrow \mathbf{x}_{i-1}$ 在两端点以外的地方与场景几何相交，则求交失败，转到步骤(5.7)；否则将交点 $\mathbf{x}_{i-1}$ 作为节点添加至当前行的路径 $\mathbf{x}_0 \rightarrow \mathbf{x}_1 \rightarrow \dots \rightarrow \mathbf{x}_{i-2}$ 末尾，构成新的路径 $\mathbf{x}_0 \rightarrow \mathbf{x}_1 \rightarrow \dots \rightarrow \mathbf{x}_{i-1}$ ；

(5.5) 计算路径 $\mathbf{x}_0 \rightarrow \mathbf{x}_1 \rightarrow \dots \rightarrow \mathbf{x}_{i-1}$ 的生成概率：若已知路径 $\mathbf{x}_0 \rightarrow \mathbf{x}_1 \rightarrow \dots \rightarrow \mathbf{x}_{i-2}$ 的生成概率为 $p(\mathbf{x}_0 \rightarrow \mathbf{x}_1 \rightarrow \dots \rightarrow \mathbf{x}_{i-2})$ ，则路径 $\mathbf{x}_0 \rightarrow \mathbf{x}_1 \rightarrow \dots \rightarrow \mathbf{x}_{i-1}$ 的生成概率计算方法为：

$$p(\mathbf{x}_0 \rightarrow \mathbf{x}_1 \rightarrow \dots \rightarrow \mathbf{x}_{i-1}) = p(\mathbf{x}_0 \rightarrow \mathbf{x}_1 \rightarrow \dots \rightarrow \mathbf{x}_{i-2}) \cdot p_V(\mathbf{x}_{i-3} \rightarrow \mathbf{x}_{i-2} \rightarrow \mathbf{x}_{i-1}^F) p_E(\mathbf{x}_{i-2} \rightarrow \mathbf{x}_{i-1}^F)$$

其中， $p_V(\mathbf{x}_{i-3} \rightarrow \mathbf{x}_{i-2} \rightarrow \mathbf{x}_{i-1}^F)$ 为 $\mathbf{x}_{i-2}$ 处入射路径方向为 $\mathbf{x}_{i-3} \rightarrow \mathbf{x}_{i-2}$ 时，生成出射射线方向为 $\mathbf{x}_{i-2} \rightarrow \mathbf{x}_{i-1}^F$ 的概率，若 $i = 1$ ，则须将这一项替换为射线源出射射线方向为 $\mathbf{x}_{i-2} \rightarrow \mathbf{x}_{i-1}^F$ 的概率； $p_E(\mathbf{x}_{i-2} \rightarrow \mathbf{x}_{i-1}^F)$ 为射线 $\mathbf{x}_{i-2} \rightarrow \mathbf{x}_{i-1}^F$ 与场景几何交于 $\mathbf{x}_{i-1}^F$ 的概率； $p_C(\mathbf{x}_{i-2} \rightarrow \mathbf{x}_{i-1})$ 为概率修正项；

(5.6) 若路径长度未满足用户要求，则转到步骤(5.1)，准备生成下一列节点；

(5.7) 对于第 $i-1$ 列的每个节点 $\mathbf{x}_{i-2}$ ，统计出其后继节点生成成功的行集合 $S_+(\mathbf{x}_{i-2})$ 和失败的行集合 $S_-(\mathbf{x}_{i-2})$ ；

(5.8) 将 $S_+(x_{i-2})$ 中各行第 i 列的节点复制进 $S_-(x_{i-2})$ 中各行的第 i 列；若第 j 行节点被复制 k 次，则令 $F_{j,i} = (k+1)F_{j,i-1}$ 。

本发明的有益效果是：

与传统方法相比，本文方法计算效率更高，且在处理大规模，遮挡关系复杂的场景时无需进行预求解波动方程，几何简化等预处理计算。本文方法使用的衍射模型无基尔霍夫近似，无限长直边假设等近似操作，因此结果精度更高，对于较简单几何体，其结果与理论衍射解完全符合。此外，基于路径跟踪的衍射算法是基于路径跟踪的传统声传播算法的自然扩展，因此本发明的方法也较易于添加至现有的声传播模拟器之中。

附图说明

图 1 是本发明中直边坐标系的示意图；

图 2 是本发明直边衍射介面项函数的绝对值图像；

图 3 是本发明直边衍射介面项采样概率分布的示意图；

图 4 是一阶衍射测试场景的布置示意图；

图 5 是本发明与对照方法在一阶衍射测试场景布置下的计算结果示意图；

图 6 是二阶衍射测试场景的布置示意图；

图 7 是本发明与对照方法在二阶衍射测试场景布置下的计算结果示意图。

具体实施方式

本发明提供了一种基于路径跟踪的声波直边衍射计算方法，包括如下步骤：

(1) 读取与衍射相关的声学环境状态，所述声学环境状态包括声源与听者位置、场景几何描述、以及几何体表面的介面特征；

(2) 在场景中随机生成大量衍射路径，所述路径由场景中一系列节点与连接节点的线段构成，路径的起始节点为声源，末尾节点为听者，其余中间节点位于场景中几何体的凸直边上；除各构成路径的节点外，路径的其它部分与场景中的几何体表面不相交；

(3) 计算每一路径的最终贡献，设有路径包含 $n+1$ 个节点，各节点从声源到听者依次编号为 x_0 到 x_n ，记节点之间线段为 $x_i \rightarrow x_{i+1}$ ，完整路径为 $x_0 \rightarrow x_1 \rightarrow \dots \rightarrow x_n$ ，则总贡献 $f(x_0 \rightarrow x_1 \rightarrow \dots \rightarrow x_n)$ 计算公式如下：

$$f(x_0 \rightarrow x_1 \rightarrow \dots \rightarrow x_n) = L_0(x_0 \rightarrow x_1) \cdot \prod_{i=0}^{n-1} M(x_i \rightarrow x_{i+1}) \prod_{i=1}^{n-1} \rho(x_{i-1} \rightarrow x_i \rightarrow x_{i+1})$$

其中， $L_0(x_0 \rightarrow x_1)$ 为声源特性， $M(x_i \rightarrow x_{i+1})$ 为 $x_i \rightarrow x_{i+1}$ 处的声介质特性， $\rho(x_{i-1} \rightarrow x_i \rightarrow x_{i+1})$

为 $\mathbf{x}_i$ 处直边衍射的径向函数表示;

(4) 将所有路径累加的贡献至冲激响应函数: 对于路径 $\mathbf{x}_0 \rightarrow \mathbf{x}_1 \rightarrow \dots \rightarrow \mathbf{x}_n$, 已知其贡献为步骤 (3) 中的 $f(\mathbf{x}_0 \rightarrow \mathbf{x}_1 \rightarrow \dots \rightarrow \mathbf{x}_n)$, 并记其生成概率为 $p(\mathbf{x}_0 \rightarrow \mathbf{x}_1 \rightarrow \dots \rightarrow \mathbf{x}_n)$, 传播延迟为 t_s , 则在原有冲激响应函数之上累加 $\delta(x-t_s) \cdot \frac{f(\mathbf{x}_0 \rightarrow \mathbf{x}_1 \rightarrow \dots \rightarrow \mathbf{x}_n)}{p(\mathbf{x}_0 \rightarrow \mathbf{x}_1 \rightarrow \dots \rightarrow \mathbf{x}_n)}$, 其中 $\delta(x)$ 为单位冲激函数;

(5) 输出步骤 (4) 产生的冲激响应函数作为衍射模拟结果。

所述基于路径跟踪的声波直边衍射计算方法, 具体为:

路径跟踪: 声传播模拟中路径跟踪的技术是声传播模拟使用的路径跟踪算法以及衍射表示在算法中的运用。

在声传播模拟中, 路径跟踪算法对下面的渲染方程进行求解:

$$L(\mathbf{x}' \rightarrow \mathbf{x}, t) = L_0(\mathbf{x}' \rightarrow \mathbf{x}, t) + \int_{\mathbf{x}'' \in \Omega} L(\mathbf{x}' \rightarrow \mathbf{x}'', t) V(\mathbf{x}'', \mathbf{x}) \rho(\mathbf{x}' \rightarrow \mathbf{x}'' \rightarrow \mathbf{x}) * M_t(\mathbf{x}'', \mathbf{x}', t) dA_{\Omega}$$

式中的 t 表示时间。 $t=0$ 的时刻为声源开始发声的时刻; $L(\mathbf{x}' \rightarrow \mathbf{x}, t)$ 为声源 $\mathbf{x}'$ 在位置 $\mathbf{x}$ 处激发的能量响应或冲激响应, 即本方程需求解的目标函数; $L_0(\mathbf{x}' \rightarrow \mathbf{x}, t)$ 代表直射成分, 即声源不与场景几何交互, 直接在 $\mathbf{x}$ 处激发出的响应; $V(\mathbf{x}'', \mathbf{x})$ 为可见性函数, 在 $\mathbf{x}''$ 与 $\mathbf{x}$ 两位置互相可见时为 1, 反之为 0; $\rho(\mathbf{x}' \rightarrow \mathbf{x}'' \rightarrow \mathbf{x})$ 为介面项, 表示入射声方向为 $\mathbf{x}' \rightarrow \mathbf{x}''$ 时, 介面上一点 $\mathbf{x}''$ 附近在方向 $\mathbf{x}'' \rightarrow \mathbf{x}$ 上产生的出射声强度; $M_t(\mathbf{x}'', \mathbf{x}', t)$ 为介质项, 表示 $\mathbf{x}''$ 与 $\mathbf{x}'$ 之间声音介质的影响, 包括能量吸收和传播延迟。星号 * 为卷积符号; Ω 表示对应场景几何体表面的点集, A_{Ω} 为该集合上的面积测度。在计算衍射时, 对于均匀介质, 使用下面的介质项:

$$M_t(\mathbf{x}'', \mathbf{x}', t) = \frac{e^{-a\|\mathbf{x}''-\mathbf{x}'\|}}{\|\mathbf{x}''-\mathbf{x}'\|} \delta\left(t - \frac{\|\mathbf{x}''-\mathbf{x}'\|}{c}\right)$$

其中 a 为介质的声衰减系数, $\|\mathbf{x}''-\mathbf{x}'\|$ 为向量 $\mathbf{x}''-\mathbf{x}'$ 的长度, $\delta(\cdot)$ 为单位冲激响应函数, c 为介质中的声速。

记上面的积分为算子 T , 则渲染方程可简记为 $L = L_0 + TL$; 使用诺依曼诺依曼 (Neumann) 级数展开来表达该方程:

$$L = \sum_{n=0}^{\infty} T^n L_0$$

算子 T 表示了声波与场景几何的一次交互。由于 T 本质上是积分，其值可以通过蒙特卡洛积分法算出。

在路径跟踪中，本发明将 $T^n L_0$ 表示为路径贡献的数学期望；一条路径由场景中一系列节点与连接节点的线段构成，其起始节点为声源，末尾节点为听者，中间节点位于场景几何体的表面上；一条含有 n 个中间节点（ $n+2$ 个节点）的路径称为 n 阶路径，与级数中的 $T^n L_0$ 一项相对应。

由介质项的表达式不难得知，一条路径的总传播延迟即路径各段时间延迟（长度除以声速）之和。因此可以单独计算出来。忽略时间项，仅计算路径贡献的强度，使用无时间参数

的介质项
$$M(\mathbf{x}'', \mathbf{x}') = \frac{e^{-a\|\mathbf{x}'' - \mathbf{x}'\|}}{\|\mathbf{x}'' - \mathbf{x}'\|}$$
 替换渲染方程中原本的介质项 M_i 。此时一条 n 阶

路径 $\mathbf{x}_0 \rightarrow \mathbf{x}_1 \rightarrow \cdots \rightarrow \mathbf{x}_{n+1}$ 的贡献表达式如下：

$$f(\mathbf{x}_0 \rightarrow \mathbf{x}_1 \rightarrow \cdots \rightarrow \mathbf{x}_{n+1}) = L_0(\mathbf{x}_0 \rightarrow \mathbf{x}_1) \cdot \prod_{i=0}^n M(\mathbf{x}_i \rightarrow \mathbf{x}_{i+1}) \prod_{i=1}^n \rho(\mathbf{x}_{i-1} \rightarrow \mathbf{x}_i \rightarrow \mathbf{x}_{i+1})$$

若上面的路径为随机生成的，则计算其贡献的数学期望时需要除以其生成概率。再考虑时间延迟，则贡献期望可计算如下：

$$\delta(x - t_s) \cdot \frac{f(\mathbf{x}_0 \rightarrow \mathbf{x}_1 \rightarrow \cdots \rightarrow \mathbf{x}_n)}{p(\mathbf{x}_0 \rightarrow \mathbf{x}_1 \rightarrow \cdots \rightarrow \mathbf{x}_n)}$$

其中 t_s 为路径的总时间延迟。使用多条路径计算期望时，期望值为各路径结果的平均值。

生成随机路径的具体方法有很多种；使用单向路径跟踪或使用双向路径跟踪均可。

直边衍射的介面项表达：使用路径跟踪计算衍射的关键在于构造对应的介面项。这里本发明将给出介面项的形式。如图 1 所示，给出了直边附近的坐标系与入射，出射路径方向的表示方法及相关符号。本发明称图中的 $\mathbf{n}$ 为法线， $\mathbf{b}$ 为副法线， $\mathbf{t}$ 为切线（ $\mathbf{t}$ 方向与直边方向重合，正负皆可）。三者构成了直边上一点处的一个标架。直边处二面角的一半记为 ϕ ，由于本文仅考虑凸直边， ϕ 的值应小于 $\pi/2$ 。入射方向向量 $\mathbf{v}_i$ 和出射方向向量 $\mathbf{v}_o$ 使用一系列角度表示：

$$\mathbf{v}_i = -\cos \theta_i \cos \varphi_i \mathbf{n} - \sin \theta_i \cos \varphi_i \mathbf{b} - \sin \varphi_i \mathbf{t}$$

$$\mathbf{v}_o = \cos \theta_o \cos \varphi_o \mathbf{n} + \sin \theta_o \cos \varphi_o \mathbf{b} + \sin \varphi_o \mathbf{t}$$

在这样的坐标系下，写出直边衍射的界面项形式；首先定义以下辅助变量：

$$r = \frac{1 - \sin \varphi_i \sin \varphi_o - |\sin \varphi_i - \sin \varphi_o|}{\cos \varphi_i \cos \varphi_o}$$

$$\kappa = \frac{\pi}{2\pi - 2\phi}$$

$$\omega_{lu} = \theta_i - \pi$$

$$\omega_{lr} = -\theta_i - \pi + 2\phi$$

$$\omega_{ru} = \theta_i + \pi$$

$$\omega_{rr} = -\theta_i + \pi - 2\phi$$

$$f_A(\theta_0, \theta_1, \theta, r, \kappa) = \frac{1}{\pi} \arctan \left(\frac{\sinh(\kappa r) \sin\left(\kappa \frac{\theta_1 - \theta_0}{2}\right)}{\cos\left(\kappa \left(\theta - \frac{\theta_1 + \theta_0}{2}\right)\right) - \cosh(\kappa r) \cos\left(\kappa \frac{\theta_1 - \theta_0}{2}\right)} \right)$$

此时，若直边上一点附近的几何表面满足 Dirichlet 边界条件，则该点处的介面项为：

$$\rho_D = \frac{1}{2} \left(\frac{df_A}{dr}(\omega_{lu}, \omega_{ru}, \theta_o, \ln r, \kappa) + \frac{df_A}{dr}(\omega_{lr}, \omega_{rr}, \theta_o, \ln r, \kappa) \right)$$

若几何表面满足 Neumann 边界条件，则介面项为：

$$\rho_N = \frac{1}{2} \left(\frac{df_A}{dr}(\omega_{lu}, \omega_{ru}, \theta_o, \ln r, \kappa) - \frac{df_A}{dr}(\omega_{lr}, \omega_{rr}, \theta_o, \ln r, \kappa) \right)$$

上述介面项的形式可由数学证明。在其它条件下，可考虑采用形如 $a\rho_D + b\rho_N$ 的介面项，其中 a, b 为二常数。

在路径跟踪中，需要从直边上一点发射射线，使其发射方向的概率分布接近介面项函数的绝对值。这一概率分布需要专门设计。为描述这一分布，需要定义一些辅助变量。令

$$D_D = \frac{1}{\kappa} \left(\frac{df_A}{dr}(\omega_{lu}, \omega_{ru}, \theta_o, 0, \kappa) + \frac{df_A}{dr}(\omega_{lr}, \omega_{rr}, \theta_o, 0, \kappa) \right) \cos^2 \varphi_o$$

$$D_N = \frac{1}{\kappa} \left(\frac{df_A}{dr}(\omega_{lu}, \omega_{ru}, \theta_o, 0, \kappa) - \frac{df_A}{dr}(\omega_{lr}, \omega_{rr}, \theta_o, 0, \kappa) \right) \cos^2 \varphi_o$$

使用 Dirichlet 边界条件时，令 $D = D_D$ ；使用 Neumann 边界条件时，令 $D = D_N$ 。其余变

量定义如下：

$$\begin{aligned}\theta_a &= \arcsin \left(\min \left\{ -\frac{1}{\tan(\kappa\pi) \cos^2 \varphi_i}, 1 \right\} \right) \\ D' &= \min \left\{ \frac{\sin \theta_a}{\pi D}, \frac{1}{2} \right\} \\ \theta_b &= \arccos \left(D' + \sqrt{(D')^2 + \cos^2 \theta_a} \right) \\ C_l &= 1 - \frac{1}{2} e^{1-2D'} \\ P_c(\theta_a, \theta_b)(x) &= \frac{1}{\pi} \left(\arctan \left(\frac{(1-x^2) \sin \theta_a}{(1+x^2) \cos \theta_a - 2x \cos \theta_b} \right) - \arctan \left(\frac{(1-x^2) \sin \theta_a}{(1+x^2) \cos \theta_a + 2x \cos \theta_b} \right) \right)\end{aligned}$$

那么，射线出射方向的概率密度函数 $p(\theta_o, \varphi_o)$ 便可以表示如下：

$$p(\theta_o, \varphi_o) = \frac{p_\theta(\theta_o) p_\varphi(\theta_o, \varphi_o)}{\cos \varphi_o}$$

其中， p_θ 是 θ_o 的概率密度函数， p_φ 是 φ_o 的概率密度函数。这两个函数的表达式如下：

$$\begin{aligned}p_\theta(\theta_o) &= \frac{\kappa}{\pi} \\ p_\varphi(\theta_o, \varphi_o) &= C_l + (1 - C_l) \frac{\kappa r^\kappa}{2 \cos \varphi_o} \frac{dP_c(\theta_a, \theta_b)}{dx} (r^\kappa)\end{aligned}$$

上面构造出的函数满足概率密度函数的非负性和归一性要求。

图 2 展示了在 Dirichlet 条件下， $\phi = \frac{\pi}{4}$ ， $\theta_i = 0.4636$ ， $\varphi_i = 0.2622$ 时的介面项绝对值，图 3 为本发明直边衍射介面项采样概率分布的示意图，展示了对应方向下的采样概率密度函数。可以看到这两图中函数的形态是非常相似的。

衍射路径的生成：在路径跟踪算法中，常见的路径生成方法是依次生成路径中的各个节点。一般是从当前路径的末尾节点射出一条方向随机的射线，若其与场景几何相交，则将交点作为原末尾节点的后继节点。然而在模拟衍射时，路径的中间节点必须位于几何体的边上，而一般的射线求交并不能保证交点满足这一要求。因此需要对其进行改动。

假设场景几何由三角网格描述。在射线求交成功之后，称射线与几何体的交点为伪交点。检查伪交点所在的三角面的各条边，并判断这些边是否为凸边。接下来在这些凸边中随机选择一条。设三角面为 $\triangle abc_1$ ，被选择的边为 ab ，则记选中该边的概率为 $P_{\triangle abc_1}$ 。在此之后，使用直线连接伪交点与 c_1 点并延长，与 ab 交于一点。称其为伪交点对应的（实际）交点，并

将它作为原末尾节点的后继节点。

现计算这种方法下节点的生成概率。记原本的路径为 $\mathbf{x}_0 \rightarrow \mathbf{x}_1 \rightarrow \dots \rightarrow \mathbf{x}_n$ ，伪交点为 $\mathbf{x}_{n+1}^F$ ，对应的交点为 $\mathbf{x}_{n+1}$ 。 $\mathbf{ab}$ 有两个相邻面，记其中与 $\triangle \mathbf{abc}_1$ 不同的另一个面为 $\triangle \mathbf{abc}_2$ 。那么，所有对应 $\mathbf{x}_{n+1}$ 的伪交点均位于线段 $\mathbf{x}_n \mathbf{c}_1$ 和 $\mathbf{x}_{n+1} \mathbf{c}_2$ 之上。接下来，计算两个辅助变量 $S(\mathbf{x}_n, \mathbf{x}_{n+1} \mathbf{c}_1)$ 和 $S(\mathbf{x}_n, \mathbf{x}_{n+1} \mathbf{c}_2)$ 。 $S(\mathbf{x}_n, \mathbf{x}_{n+1} \mathbf{c}_1)$ 的计算方法如下：

(3.1) 找出 $\mathbf{x}_{n+1} \mathbf{c}_1$ 对于 $\mathbf{x}_n$ 可见（未被遮挡）的部分。由于场景由三角面片组成，可见部分必然是一系列不相交线段的集合；通过找出与场景几何中三角形 $\triangle \mathbf{x}_n \mathbf{x}_{n+1} \mathbf{c}_1$ 相交的三角面片来算得所有遭到遮挡的线段，然后从 $\mathbf{x}_{n+1} \mathbf{c}_1$ 中去除这些被遮挡的线段，余下的就是可见的线段集合。记这些可见线段为 $\mathbf{x}_j^{VL} \mathbf{x}_j^{VR}$, $j \in \{1, 2, \dots, k\}$ ，其中 $\mathbf{x}_j^{VL}$ 相比 $\mathbf{x}_j^{VR}$ 更靠近 $\mathbf{c}_1$ 一端。

(3.2) 计算 $S(\mathbf{x}_n, \mathbf{x}_{n+1} \mathbf{c}_1)$ 。公式为

$$S(\mathbf{x}_n, \mathbf{x}_{n+1} \mathbf{c}_1) = \sum_{j=1}^k \left(\left(\frac{\|\mathbf{x}_j^{VR} - \mathbf{c}_1\|}{\|\mathbf{x}_{n+1} - \mathbf{c}_1\|} \right)^2 - \left(\frac{\|\mathbf{x}_j^{VL} - \mathbf{c}_1\|}{\|\mathbf{x}_{n+1} - \mathbf{c}_1\|} \right)^2 \right)$$

$S(\mathbf{x}_n, \mathbf{x}_{n+1} \mathbf{c}_2)$ 的计算方法与上面相同。

最终，给出节点生成概率的一个估计：

$$p_V(\mathbf{x}_{n-1} \rightarrow \mathbf{x}_n \rightarrow \mathbf{x}_{n+1}^F) p_E(\mathbf{x}_n \rightarrow \mathbf{x}_{n+1}^F) p_C(\mathbf{x}_n \rightarrow \mathbf{x}_{n+1})$$

其中， $p_V(\mathbf{x}_{n-1} \rightarrow \mathbf{x}_n \rightarrow \mathbf{x}_{n+1}^F)$ 为 $\mathbf{x}_n$ 处入射路径方向为 $\mathbf{x}_{n-1} \rightarrow \mathbf{x}_n$ 时，生成出射方向 $\mathbf{x}_n \rightarrow \mathbf{x}_{n+1}^F$ 的概率，具体概率分布由算法实现者决定。若 $n=0$ ，则须将这一项替换为射线源出射射线方向为 $\mathbf{x}_n \rightarrow \mathbf{x}_{n+1}^F$ 的概率。 $p_E(\mathbf{x}_n \rightarrow \mathbf{x}_{n+1}^F)$ 为出射射线与场景交于 $\mathbf{x}_{n+1}^F$ 的概率，其计算公式如下：

$$p_E(\mathbf{x}_n \rightarrow \mathbf{x}_{n+1}^F) = \frac{|\cos \theta_{n+1}^F|}{\|\mathbf{x}_{n+1}^F - \mathbf{x}_n\|^2}$$

其中 θ_{n+1}^F 为射线 $\mathbf{x}_n \rightarrow \mathbf{x}_{n+1}^F$ 与 $\mathbf{x}_{n+1}^F$ 所在三角面法线的夹角。 $p_C(\mathbf{x}_n \rightarrow \mathbf{x}_{n+1})$ 为概率修正项，计算公式如下：

$$p_C(\mathbf{x}_n \rightarrow \mathbf{x}_{n+1}) = \frac{p_{\triangle \mathbf{abc}_1} A_{\triangle \mathbf{abc}_1} S(\mathbf{x}_n, \mathbf{x}_{n+1} \mathbf{c}_1) + p_{\triangle \mathbf{abc}_2} A_{\triangle \mathbf{abc}_2} S(\mathbf{x}_n, \mathbf{x}_{n+1} \mathbf{c}_2)}{\|\mathbf{b} - \mathbf{a}\|}$$

其中 $A_{\triangle \mathbf{abc}_1}$ 为 $\triangle \mathbf{abc}_1$ 的面积， $A_{\triangle \mathbf{abc}_2}$ 同理。由于 $\mathbf{x}_{n+1}$ 对应的 $\mathbf{x}_{n+1}^F$ 不止一个，上面的概率本身并

不直接等同于生成节点 $\mathbf{x}_{n+1}$ 的生成概率，但其期望确实与生成 $\mathbf{x}_{n+1}$ 的概率相等。

增加节点后的路径生成概率如下:

$$p(\mathbf{x}_0 \rightarrow \mathbf{x}_1 \rightarrow \cdots \rightarrow \mathbf{x}_{n+1}) = p(\mathbf{x}_0 \rightarrow \mathbf{x}_1 \rightarrow \cdots \rightarrow \mathbf{x}_n) \cdot p_V(\mathbf{x}_{n-1} \rightarrow \mathbf{x}_n \rightarrow \mathbf{x}_{n+1}^F) p_E(\mathbf{x}_n \rightarrow \mathbf{x}_{n+1}^F) p_C(\mathbf{x}_n \rightarrow \mathbf{x}_{n+1})$$

所述双向路径跟踪中，对于双向路径跟踪需要从声源和听者两端同时生成路径，然后在两条路径的节点之间建立连接，生成完整路径。此时完整路径的生成概率为 $p_F \cdot p_B \cdot p_L$ 。其中 p_F 为前向子路径从声源到被连接处的部分生成概率， p_B 为后向子路径从听者到被连接处的部分的生成概率， p_L 为建立连接的概率。

此外，本发明还可采用多重重要性采样，它为是一种提高样本质量的方法，在双向路径跟踪中通常会配合使用。对于一条路径，多重重要性采样要求给出这条路径在所有生成方式下的生成概率。假设通过双向路径跟踪产生了一条路径 $\mathbf{x}_0 \rightarrow \mathbf{x}_1 \rightarrow \cdots \rightarrow \mathbf{x}_n$ 。它的连接段可能是路径中的任何一段，因此共有 $n-1$ 中可能的生成方式。这些生成方式下路径生成概率的求法。在声波直边衍射计算基础之上结合多重重要性采样技术后，为计算多重重要性采样技术中各种策略的概率，须为每个非起点或终点的节点生成对应的前向和后向伪交点，其中前向伪交点对该节点的前趋节点可见，后向伪交点对该节点的后继节点可见；具体如下：

设路径 $\mathbf{x}_0 \rightarrow \mathbf{x}_1 \rightarrow \cdots \rightarrow \mathbf{x}_n$ 由双向路径跟踪生成, 其连接段为 $\mathbf{x}_i \rightarrow \mathbf{x}_{i+1}$, 那么这条路径的生成概率为 $p(\mathbf{x}_0 \rightarrow \mathbf{x}_1 \rightarrow \cdots \rightarrow \mathbf{x}_i) p(\mathbf{x}_{i+1} \leftarrow \mathbf{x}_{i+2} \leftarrow \cdots \leftarrow \mathbf{x}_n) p_L(\mathbf{x}_i \rightarrow \mathbf{x}_{i+1})$ 。这里 $\mathbf{x}_{i+1} \leftarrow \mathbf{x}_{i+2} \leftarrow \cdots \leftarrow \mathbf{x}_n$ 的含义等同于 $\mathbf{x}_n \rightarrow \mathbf{x}_{n-1} \rightarrow \cdots \rightarrow \mathbf{x}_{i+1}$ 。将计算路径生成概率所涉及到的场景位置列出如下:

$$\begin{array}{ccccccc} & \mathbf{x}_1^F & & \mathbf{x}_{i-1}^F & \mathbf{x}_i^F & & \\ \mathbf{x}_0 \rightarrow & \mathbf{x}_1 & \rightarrow \cdots \rightarrow & \mathbf{x}_{i-1} & \rightarrow \mathbf{x}_i & \rightarrow \mathbf{x}_{i+1} & \rightarrow \mathbf{x}_{i+2} \rightarrow \cdots \rightarrow \mathbf{x}_{n-1} \rightarrow \mathbf{x}_n \\ & & & & & \mathbf{x}_{i+1}^B & \mathbf{x}_{i+2}^B & \mathbf{x}_{n-1}^B \end{array}$$

这里类似于 $\mathbf{x}_i^B$ 的点与 $\mathbf{x}_{i-1}^F$ 一样，是伪交点，称之为“后向伪交点”。它们对应的是反向路径上的节点。由反向路径的生成过程可知， $\mathbf{x}_i^B$ 对 $\mathbf{x}_{i+1}$ 可见，但不能保证对 $\mathbf{x}_{i-1}$ 可见，与 $\mathbf{x}_{i-1}^F$ 这样的伪交点（称为前向伪交点）正好相反。

改变上面图示中 i 的值可知,为了求得连接段为其他路径段时的生成概率,每一个中间节点都需要有对应的前向和后向伪交点。因此需要主动补齐图示中缺失的伪交点。这里将给出补齐前向伪交点的方法,补齐反向伪交点的方法与之相似。

假设 $\mathbf{x}_{i+1}$ 没有对应的前向伪交点，首先寻找 $\mathbf{x}_{i+1}$ 所在的边，此处记其为 ab 。与这条边相邻的两个邻面记为 $\triangle abc_1$ 和 $\triangle abc_2$ 。再找出线段 $\mathbf{x}_{i+1}\mathbf{c}_1$ 和 $\mathbf{x}_{i+1}\mathbf{c}_2$ 相对于 $\mathbf{x}_i$ 可见的部分，并将其表示为线段的集合，每条线段使用 $\mathbf{x}_j^{VL}\mathbf{x}_j^{VR}$, $j \in \{1, 2, \dots, k\}$ 表示。定义函数：

$$f_{\text{lerp}}(\mathbf{x}_a, \mathbf{x}_b)(x) = (1 - \sqrt{x})\mathbf{x}_a + \sqrt{x}\mathbf{x}_b$$

$$f_{\text{lerp}}^{-1}(\mathbf{x}_a, \mathbf{x}_b)(\mathbf{x}) = \left(\frac{\|\mathbf{x} - \mathbf{x}_a\|}{\|\mathbf{x}_b - \mathbf{x}_a\|} \right)^2$$

接下来，对每条线段 $\mathbf{x}_j^{VL}\mathbf{x}_j^{VR}$ ，若其为 $\mathbf{x}_{i+1}\mathbf{c}_1$ 的子集，则通过 $f_{\text{lerp}}^{-1}(\mathbf{c}_1, \mathbf{x}_{i+1})$ 将其映射到集合 $[0, 1]$ 中；若其为 $\mathbf{x}_{i+1}\mathbf{c}_2$ 的子集，则通过 $f_{\text{lerp}}^{-1}(\mathbf{c}_2, \mathbf{x}_{i+1})$ 将其映射到集合 $[0, 1]$ 中；其次，在映射后的线段集合中按照均匀分布随机选取一点；最后通过 f_{lerp} 将选取的这一点映射回原本的线段集合，并以之作为伪交点。

补全伪交点后，便可算出所有生成方式下的路径生成概率。

此外，本发明也可实用其他优化：

当生成路径概率过小，或路径贡献相对生成概率过大时，结果中会出现可能影响用户体验的极端值。因此需要识别出这些极端值并去除之。

给定一条路径 $\mathbf{x}_0 \rightarrow \mathbf{x}_1 \rightarrow \dots \rightarrow \mathbf{x}_{n+1}$ ，定义辅助变量如下：

$$C_o(\mathbf{x}_i \rightarrow \mathbf{x}_{i+1}) = \frac{p_V(\mathbf{x}_{i-1} \rightarrow \mathbf{x}_i \rightarrow \mathbf{x}_{i+1})}{p_V(\mathbf{x}_{i-1} \rightarrow \mathbf{x}_i \rightarrow \mathbf{x}_{i+1}^F)} \cdot \frac{\|\mathbf{x}_{i+1} - \mathbf{x}_i\|^2}{\|\mathbf{x}_{i+1}^F - \mathbf{x}_i\|^2 |\cos \theta_{i+1}^F|}$$

其中 p_V 与 θ_{i+1}^F 的定义与第三节中相同。若 $i=0$ ， p_V 也需要按照第三章中的方法替换。这一变量表示了包含该段的路径产生极端值的可能性。整条路径的 C_o 值为路径各段的 C_o 值之积。若路径由多段子路径连接而成（如双向路径跟踪），则其 C_o 值为各段子路径的 C_o 值之积。接下来，在路径的最终贡献上乘以一个值 C_s ：

$$C_s = \frac{C_o^* \cdot (1 - e^{-2C_o/C_o^*})}{C_o \cdot (1 + e^{-2C_o/C_o^*})}$$

这里的 C_o^* 为一由用户定义的变量（通常在 100-1000 之间即可）。上面的乘数将压低 $C_o > C_o^*$ 的所有路径的贡献，从而减少极端值的产生。

若生成路径后继节点方法的效率并不够高，在双向路径跟踪中，为了提高节点的利用效

率, 可以使用下面的方法: 首先假设模拟算法中一次生成的路径有 M 条, 路径的最大阶数为 $N-2$ 。因此这些路径共有 $M \times N$ 个节点。这些节点, 无论实际是否被成功生成, 均排列于一个 M 行 N 列的数组当中。对于数组中的每个节点, 定义一个变量 $F_{j,i}$, $j=1, 2, \dots, M, i=1, 2, \dots, N$, 称为拆分值, 并令 $F_{j,1}=1$ 。数组中的节点需要逐行生成。对于数组中的第 i 列节点, 具体生成过程如下: 尝试通过第三节中的方法生成第 i 列中的所有节点; 对于第 $i-1$ 列的每个节点 $\mathbf{x}$, 统计出其后继节点生成成功的行集合 $S_+(\mathbf{x})$ 和失败的行集合 $S_-(\mathbf{x})$; 将 $S_+(\mathbf{x})$ 中各行第 i 列的节点复制进 $S_-(\mathbf{x})$ 中各行的第 i 列。若第 j 行节点被复制 k 次, 则令 $F_{j,i}=(k+1)F_{j,i-1}$ 。设路径到此节点的贡献期望为 $L_{j,i}$, 建议各节点的复制次数与 $L_{j,i}/F_{j,i-1}$ 成正比。

在建立正反向路径连接, 生成最终路径时, 应当让最终路径的贡献期望除以正反向路径连接节点对应的两个拆分值之积。通过这种方式, 充分利用数组当中的空位, 节省存储空间, 提高节点连接效率。

实施实例

发明人在一台配备 Intel i7 2.60GHz 四核中央处理器, 12GB 内存的计算机上实现了上文所描述的算法, 具体技术选择为结合多重重要性采样的双向路径跟踪, 并使用了实施过程描述第五节中的所有优化技巧。本发明将其结果与使用 UTD 和 BTM 模型的模拟结果进行了比较。

图 4 与图 6 展示了用于比较的一阶和二阶衍射场景。图 4 中的场景包含一个直边长度为 2m 的直二面角, 图 6 中的场景则包含两个平行的直二面角, 从声源发出的路径必须经过两次衍射, 才能到达听者。两场景几何均使用狄利克雷 (Dirichlet) 边界条件。图 5 与图 7 展示了场景中使用不同方法算得的冲激响应, 此处使用的方法包括 BTM、UTD、本文方法以及选取 UTD 中 8 个频点 (位于 62.5-8000Hz 之间, 以指数间隔方式分布) 重构出的结果 UTD 方法计算二阶及以上衍射误差甚大, 在图 7 中未展示。可以看到, 本文算法在一至二阶衍射情况下的计算结果质量与已有方法没有明显的差异, 且明显优于常见的简化 UTD 方案 (仅计算 8 个频率上的结果), 由于 BTM 方法对于一阶衍射的解是精确的, 这一比较也验证了本发明中方法的正确性。对于大规模复杂场景, 本方法展现出了接近实时的计算效率。在使用 12000 条路径的情况下, 对于包含 22974 三角面的模型, 本发明的实现计算衍射冲激响应的的时间开销为约 140ms。对于包含 279133 面的模型, 时间开销则为约 205ms。由此可见, 本发明方法适合在复杂场景中进行快速的衍射结果计算。

以上所述实施例表达了本发明的具体实施方式, 其描述较为具体和详细, 旨在用于帮助

理解本发明的方法及其核心思想，但并不能因此而理解为对本发明专利范围的限制。应当指出的是，对于本领域的普通技术人员来说，在不脱离本发明构思的前提下，还可以做出若干变形和改进，这些都属于本发明的保护范围。因此，本发明专利的保护范围应以所附权利要求为准。

权利要求书

1、一种基于路径跟踪的声波直边衍射计算方法，其特征在于，包括如下步骤：

(1) 读取与衍射相关的声学环境状态，所述声学环境状态包括声源与听者位置、场景几何描述、以及几何体表面的介面特征；

(2) 在场景中随机生成大量衍射路径，所述路径由场景中一系列节点与连接节点的线段构成，路径的起始节点为声源，末尾节点为听者，其余中间节点位于场景中几何体的凸直边上；除各构成路径的节点外，路径的其它部分与场景中的几何体表面不相交；

(3) 计算每一路径的最终贡献，设有路径包含 $n+1$ 个节点，各节点从声源到听者依次编号为 $\mathbf{x}_0$ 到 $\mathbf{x}_n$ ，记节点之间线段为 $\mathbf{x}_i \rightarrow \mathbf{x}_{i+1}$ ，完整路径为 $\mathbf{x}_0 \rightarrow \mathbf{x}_1 \rightarrow \dots \rightarrow \mathbf{x}_n$ ，则总贡献 $f(\mathbf{x}_0 \rightarrow \mathbf{x}_1 \rightarrow \dots \rightarrow \mathbf{x}_n)$ 计算公式如下：

$$f(\mathbf{x}_0 \rightarrow \mathbf{x}_1 \rightarrow \dots \rightarrow \mathbf{x}_n) = L_0(\mathbf{x}_0 \rightarrow \mathbf{x}_1) \cdot \prod_{i=0}^{n-1} M(\mathbf{x}_i \rightarrow \mathbf{x}_{i+1}) \prod_{i=1}^{n-1} \rho(\mathbf{x}_{i-1} \rightarrow \mathbf{x}_i \rightarrow \mathbf{x}_{i+1})$$

其中， $L_0(\mathbf{x}_0 \rightarrow \mathbf{x}_1)$ 为声源特性， $M(\mathbf{x}_i \rightarrow \mathbf{x}_{i+1})$ 为 $\mathbf{x}_i \rightarrow \mathbf{x}_{i+1}$ 处的声介质特性， $\rho(\mathbf{x}_{i-1} \rightarrow \mathbf{x}_i \rightarrow \mathbf{x}_{i+1})$ 为 $\mathbf{x}_i$ 处直边衍射的径向函数表示；

(4) 将所有路径累加的贡献至冲激响应函数：对于路径 $\mathbf{x}_0 \rightarrow \mathbf{x}_1 \rightarrow \dots \rightarrow \mathbf{x}_n$ ，已知其贡献为步骤 (3) 中的 $f(\mathbf{x}_0 \rightarrow \mathbf{x}_1 \rightarrow \dots \rightarrow \mathbf{x}_n)$ ，并记其生成概率为 $p(\mathbf{x}_0 \rightarrow \mathbf{x}_1 \rightarrow \dots \rightarrow \mathbf{x}_n)$ ，传播延迟为 t_s ，则在原有冲激响应函数之上累加 $\delta(x - t_s) \cdot \frac{f(\mathbf{x}_0 \rightarrow \mathbf{x}_1 \rightarrow \dots \rightarrow \mathbf{x}_n)}{p(\mathbf{x}_0 \rightarrow \mathbf{x}_1 \rightarrow \dots \rightarrow \mathbf{x}_n)}$ ，其中 $\delta(x)$ 为单位冲激函数；

(5) 输出步骤 (4) 产生的冲激响应函数作为衍射模拟结果。

2、根据权利要求 1 所述的一种基于路径跟踪的声波直边衍射计算方法，其特征在于，所述步骤 (2) 包括如下子步骤：

(2.1) 初始化路径，使其包含的唯一节点为路径起点；

(2.2) 设当前路径状态为 $\mathbf{x}_0 \rightarrow \mathbf{x}_1 \rightarrow \dots \rightarrow \mathbf{x}_n$ ，从 $\mathbf{x}_n$ 出发随机射出一条射线；若 $\mathbf{x}_n$ 不是路径起点，则使用与直边衍射径向函数相匹配的采样函数决定射线的出射角度；

(2.3) 记射线与场景几何表面的首个交点为 $\mathbf{x}_{n+1}^F$ ，并称其为伪交点；若该点不存在，则求交失败，转到步骤 (2.8)；

(2.4) 在步骤 (2.3) 中伪交点 $\mathbf{x}_{n+1}^F$ 所在三角面的三条边中随机选择一条；设三角面为 $\triangle abc$ ，被选择的边为 ab ，该边所对的顶点为 c ，则用直线连接 c 与 $\mathbf{x}_{n+1}^F$ 并延长，与 ab 交于一点，记为 $\mathbf{x}_{n+1}$ ，称为交点；

(2.5) 若步骤 (2.4) 中的边 ab 不是凸直边，或者线段 $\mathbf{x}_n \rightarrow \mathbf{x}_{n+1}$ 在两端点以外的地方与场景几何相交，则求交失败，转到步骤 (2.8)；否则将交点 $\mathbf{x}_{n+1}$ 作为节点添加至路径 $\mathbf{x}_0 \rightarrow \mathbf{x}_1 \rightarrow \dots \rightarrow \mathbf{x}_n$ 末尾，构成新的路径 $\mathbf{x}_0 \rightarrow \mathbf{x}_1 \rightarrow \dots \rightarrow \mathbf{x}_{n+1}$ ；

(2.6) 计算路径 $\mathbf{x}_0 \rightarrow \mathbf{x}_1 \rightarrow \dots \rightarrow \mathbf{x}_{n+1}$ 的生成概率：若已知路径 $\mathbf{x}_0 \rightarrow \mathbf{x}_1 \rightarrow \dots \rightarrow \mathbf{x}_n$ 的生成概率为 $p(\mathbf{x}_0 \rightarrow \mathbf{x}_1 \rightarrow \dots \rightarrow \mathbf{x}_n)$ ，则路径 $\mathbf{x}_0 \rightarrow \mathbf{x}_1 \rightarrow \dots \rightarrow \mathbf{x}_{n+1}$ 的生成概率计算方法为

$$p(\mathbf{x}_0 \rightarrow \mathbf{x}_1 \rightarrow \dots \rightarrow \mathbf{x}_{n+1}) = p(\mathbf{x}_0 \rightarrow \mathbf{x}_1 \rightarrow \dots \rightarrow \mathbf{x}_n) \cdot p_V(\mathbf{x}_{n-1} \rightarrow \mathbf{x}_n \rightarrow \mathbf{x}_{n+1}^F) p_E(\mathbf{x}_n \rightarrow \mathbf{x}_{n+1}^F) p_C(\mathbf{x}_n \rightarrow \mathbf{x}_{n+1})$$

其中， $p_V(\mathbf{x}_{n-1} \rightarrow \mathbf{x}_n \rightarrow \mathbf{x}_{n+1}^F)$ 为 $\mathbf{x}_n$ 处入射路径方向为 $\mathbf{x}_{n-1} \rightarrow \mathbf{x}_n$ 时，生成出射射线方向为 $\mathbf{x}_n \rightarrow \mathbf{x}_{n+1}^F$ 的概率，若 $n=0$ ，则须将这一项替换为射线源出射射线方向为 $\mathbf{x}_n \rightarrow \mathbf{x}_{n+1}^F$ 的概率；

$p_E(\mathbf{x}_n \rightarrow \mathbf{x}_{n+1}^F)$ 为射线 $\mathbf{x}_n \rightarrow \mathbf{x}_{n+1}^F$ 与场景几何交于 $\mathbf{x}_{n+1}^F$ 的概率； $p_C(\mathbf{x}_n \rightarrow \mathbf{x}_{n+1})$ 为概率修正项；

(2.7) 若路径长度未满足用户要求，则转到步骤 (2.2)；

(2.8) 将当前路径作为场景中的衍射路径。

3、根据权利要求 1 所述的一种基于路径跟踪的声波直边衍射计算方法，其特征在于，所述步骤 (2) 中，从声源和听者两端同时生成路径，从声源出发的路径称为前向子路径，从听者出发的路径称为后向子路径；之后，在前后向子路径的节点之间随机建立连接，以构成从声源到听者的完整路径；设前向子路径从声源到被连接处的部分生成概率为 p_F ，后向子路径从听者到被连接处的部分的生成概率为 p_B ，建立连接的概率为 p_L ，则完整路径的生成概率为

$$p_F \cdot p_B \cdot p_L。$$

4、根据权利要求 1 所述的一种基于路径跟踪的声波直边衍射计算方法，其特征在于，所述步骤 (5) 中，路径的贡献需乘以一用于抑制极端值的因子 C_s ：

$$C_s = \frac{C_o^* \cdot (1 - e^{-2C_o/C_o^*})}{C_o \cdot (1 + e^{-2C_o/C_o^*})}$$

其中 C_o^* 为一由用户定义的变量, C_o 为路径中随机生成的各段对应的 C_o 之积, 每一路径段的 C_o 为衡量包含该路径段的路径产生极端值的可能性的一参数。

5、根据权利要求3所述的一种基于路径跟踪的声波直边衍射计算方法, 其特征在于, 所述步骤(3)中, 计算贡献需除以正反向路径连接节点对应位置的 $[F_{j,i}]$ 中元素之积; 所述 $[F_{j,i}]$ 为一个 M 行 N 列的数组, 其中 N 为前向与后向路径的最大节点数; 所述路径的节点存储于一个行列数相同的数组当中, 其中的每一行对应一条单独的路径, 令数组 $[F_{j,i}]$ 第一列各元素为1, 节点数组第一列为路径起点; 在第 $i-1$ 列节点已经生成的情况下, 数组中的第 i 列节点的生成过程包括如下子步骤:

(5.1) 从节点数组每一行的第 $i-1$ 个节点 $\mathbf{x}_{i-2}$ 出发, 随机射出一条射线; 若 $i > 1$, 则使用与直边衍射径向函数相匹配的采样函数决定射线的出射角度;

(5.2) 记射线与场景几何表面的首个交点为 $\mathbf{x}_{i-1}^F$, 并称其为伪交点; 若该点不存在, 则求交失败, 转到步骤(5.7);

(5.3) 在步骤(5.2)中伪交点 $\mathbf{x}_{i-1}^F$ 所在三角面的三条边中随机选择一条; 设三角面为 $\triangle abc$, 被选择的边为 ab , 该边所对的顶点为 c , 则用直线连接 c 与 $\mathbf{x}_{i-1}^F$ 并延长, 与 ab 交于一点, 记为 $\mathbf{x}_{i-1}$, 称为交点;

(5.4) 若步骤(5.3)中的边 ab 非凸直边, 或者线段 $\mathbf{x}_{i-2} \rightarrow \mathbf{x}_{i-1}$ 在两端点以外的地方与场景几何相交, 则求交失败, 转到步骤(5.7); 否则将交点 $\mathbf{x}_{i-1}$ 作为节点添加至当前行的路径 $\mathbf{x}_0 \rightarrow \mathbf{x}_1 \rightarrow \dots \rightarrow \mathbf{x}_{i-2}$ 末尾, 构成新的路径 $\mathbf{x}_0 \rightarrow \mathbf{x}_1 \rightarrow \dots \rightarrow \mathbf{x}_{i-1}$;

(5.5) 计算路径 $\mathbf{x}_0 \rightarrow \mathbf{x}_1 \rightarrow \dots \rightarrow \mathbf{x}_{i-1}$ 的生成概率: 若已知路径 $\mathbf{x}_0 \rightarrow \mathbf{x}_1 \rightarrow \dots \rightarrow \mathbf{x}_{i-2}$ 的生成概率为 $p(\mathbf{x}_0 \rightarrow \mathbf{x}_1 \rightarrow \dots \rightarrow \mathbf{x}_{i-2})$, 则路径 $\mathbf{x}_0 \rightarrow \mathbf{x}_1 \rightarrow \dots \rightarrow \mathbf{x}_{i-1}$ 的生成概率计算方法为:

$$p(\mathbf{x}_0 \rightarrow \mathbf{x}_1 \rightarrow \dots \rightarrow \mathbf{x}_{i-1}) = p(\mathbf{x}_0 \rightarrow \mathbf{x}_1 \rightarrow \dots \rightarrow \mathbf{x}_{i-2}) \cdot p_V(\mathbf{x}_{i-3} \rightarrow \mathbf{x}_{i-2} \rightarrow \mathbf{x}_{i-1}^F) p_E(\mathbf{x}_{i-2} \rightarrow \mathbf{x}_{i-1})$$

其中, $p_V(\mathbf{x}_{i-3} \rightarrow \mathbf{x}_{i-2} \rightarrow \mathbf{x}_{i-1}^F)$ 为 $\mathbf{x}_{i-2}$ 处入射路径方向为 $\mathbf{x}_{i-3} \rightarrow \mathbf{x}_{i-2}$ 时, 生成出射射线方向为 $\mathbf{x}_{i-2} \rightarrow \mathbf{x}_{i-1}^F$ 的概率, 若 $i = 1$, 则须将这一项替换为射线源出射射线方向为

$\mathbf{x}_{i-2} \rightarrow \mathbf{x}_{i-1}^F$ 的概率; $p_E(\mathbf{x}_{i-2} \rightarrow \mathbf{x}_{i-1}^F)$ 为射线 $\mathbf{x}_{i-2} \rightarrow \mathbf{x}_{i-1}^F$ 与场景几何交于 $\mathbf{x}_{i-1}^F$ 的概率;
 $p_C(\mathbf{x}_{i-2} \rightarrow \mathbf{x}_{i-1})$ 为概率修正项;

(5.6) 若路径长度未满足用户要求, 则转到步骤 (5.1), 准备生成下一列节点;

(5.7) 对于第 $i-1$ 列的每个节点 $\mathbf{x}_{i-2}$, 统计出其后继节点生成成功的行集合 $S_+(\mathbf{x}_{i-2})$ 和失败的行集合 $S_-(\mathbf{x}_{i-2})$;

(5.8) 将 $S_+(\mathbf{x}_{i-2})$ 中各行第 i 列的节点复制进 $S_-(\mathbf{x}_{i-2})$ 中各行的第 i 列; 若第 j 行节点被复制 k 次, 则令 $F_{j,i} = (k+1)F_{j,i-1}$ 。

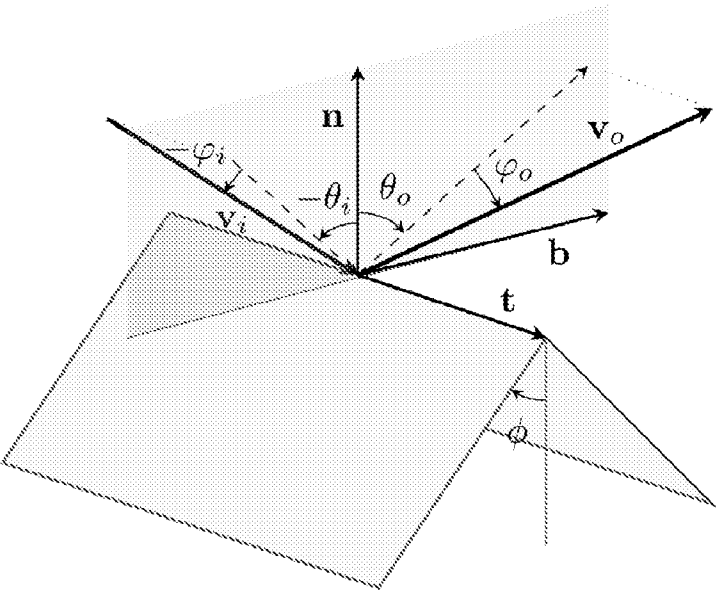


图 1

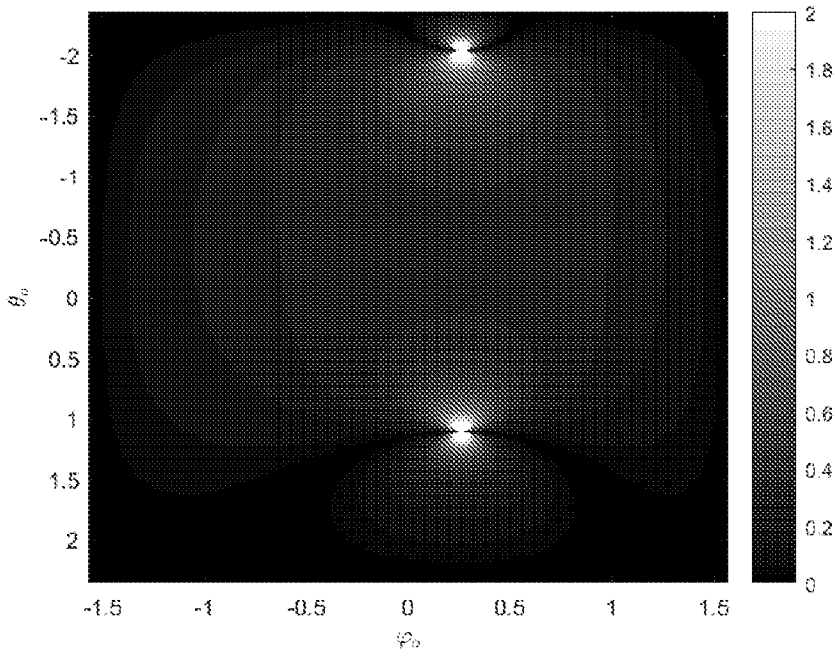


图 2

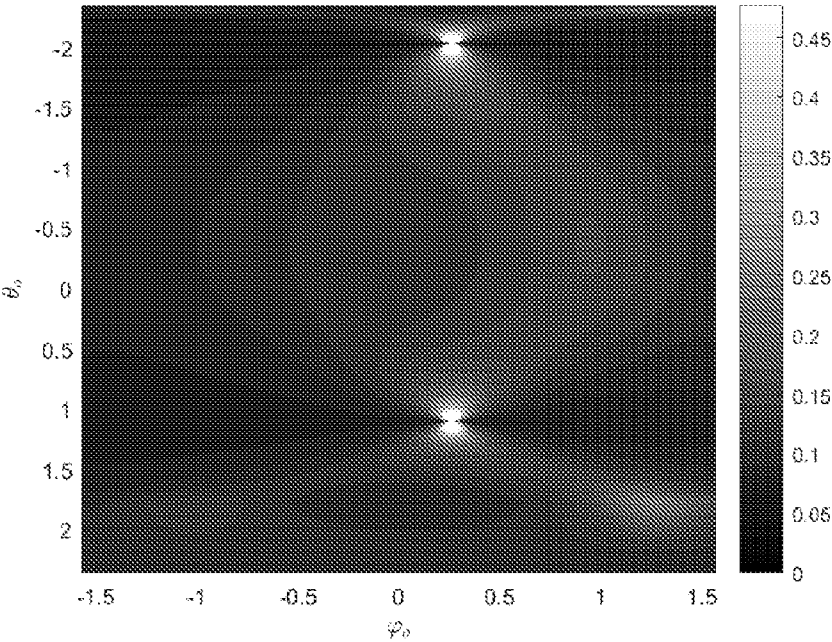


图 3

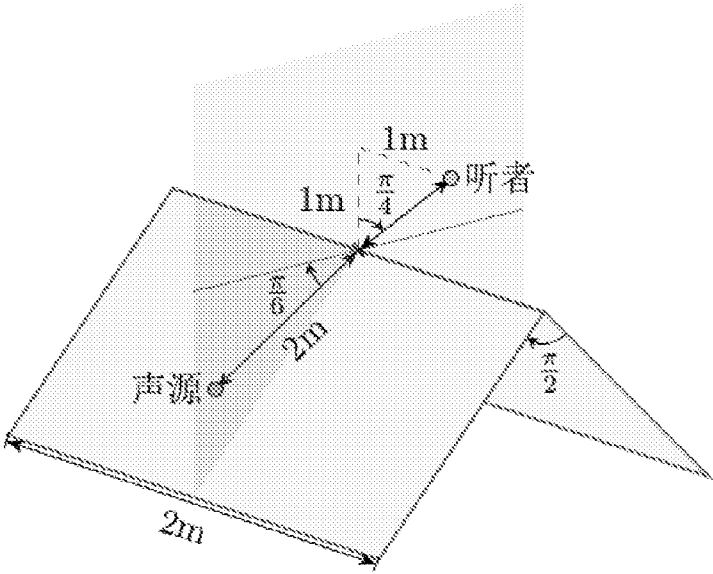


图 4

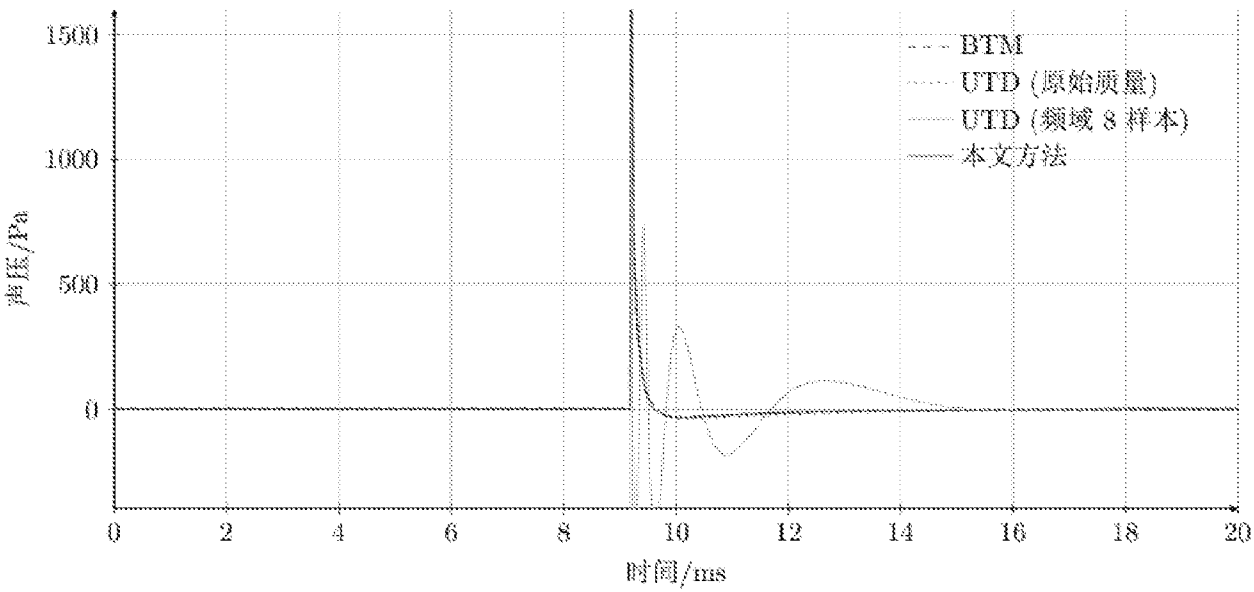


图 5

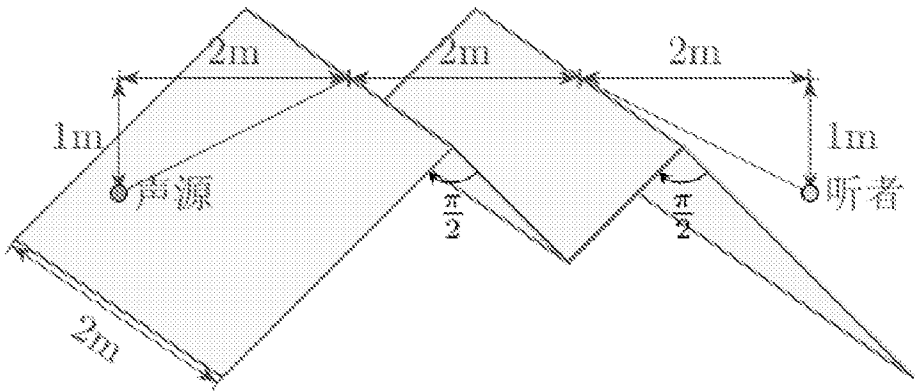


图 6

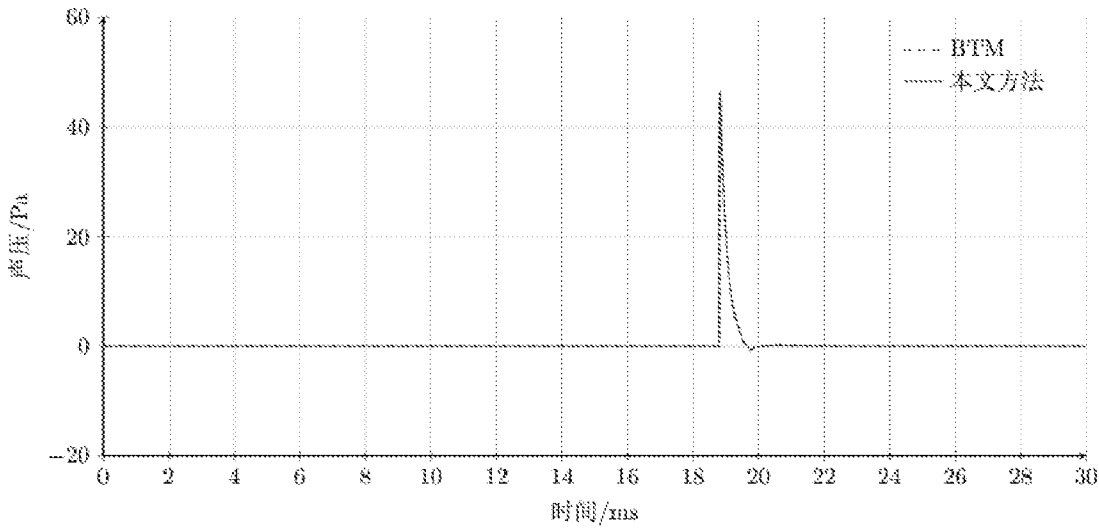


图 7

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/CN2022/136882

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

G06F 17/00(2019.01)i; G01S 11/14(2006.01)i

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

IPC: G06F, G01S

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

CNABS, VEN, CNTXT, USTXT, WOTXT, EPTXT, CNKI, IEEE: 声波, 声音, 衍射, 路径, 跟踪, 追踪, 冲激响应, sound wave, diffraction, path, track+, respons+

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	CN 105893719 A (ZHEJIANG UNIVERSITY) 24 August 2016 (2016-08-24) description, paragraphs 8-120, and figures 1-7	1-5
A	CN 114003855 A (ELECTRIC POWER SCIENCE RESEARCH INSTITUTE OF STATE GRID CHONGQING ELECTRIC POWER COMPANY et al.) 01 February 2022 (2022-02-01) entire document	1-5
A	JP 2006208273 A (ASAHI KASEI HOMES KK) 10 August 2006 (2006-08-10) entire document	1-5
A	US 2015378019 A1 (THE UNIVERSITY OF NORTH CAROLINA AT CHAPEL HILL) 31 December 2015 (2015-12-31) entire document	1-5



Further documents are listed in the continuation of Box C.



See patent family annex.

* Special categories of cited documents:

“A” document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

“D” document cited by the applicant in the international application

“E” earlier application or patent but published on or after the international filing date

“L” document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

“O” document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

“P” document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

“T” later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

“X” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

“Y” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art

“&” document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search

08 June 2023

Date of mailing of the international search report

20 June 2023

Name and mailing address of the ISA/CN

China National Intellectual Property Administration (ISA/
CN)
China No. 6, Xitucheng Road, Jimenqiao, Haidian District,
Beijing 100088

Authorized officer

Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.

PCT/CN2022/136882

Patent document cited in search report			Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)			Publication date (day/month/year)
CN	105893719	A	24 August 2016	None			
CN	114003855	A	01 February 2022	None			
JP	2006208273	A	10 August 2006	JP	4363528	B2	11 November 2009
US	2015378019	A1	31 December 2015	US	10679407	B2	09 June 2020

国际检索报告

国际申请号

PCT/CN2022/136882

A. 主题的分类

G06F 17/00(2019.01)i; G01S 11/14(2006.01)i

按照国际专利分类(IPC)或者同时按照国家分类和IPC两种分类

B. 检索领域

检索的最低限度文献(标明分类系统和分类号)

IPC: G06F, G01S

包含在检索领域中的除最低限度文献以外的检索文献

在国际检索时查阅的电子数据库(数据库的名称, 和使用的检索词(如使用))

CNABS, VEN, CNTXT, USTXT, WOTXT, EPTXT, CNKI, IEEE: 声波, 声音, 衍射, 路径, 跟踪, 追踪, 冲激响应, sound wave, diffraction, path, track+, respons+

C. 相关文件

类 型*

引用文件, 必要时, 指明相关段落

相关的权利要求

A

CN 105893719 A (浙江大学) 2016年8月24日 (2016 - 08 - 24)
说明书第8-120段, 图1-7

1-5

A

CN 114003855 A (国网重庆市电力公司电力科学研究院 等) 2022年2月1日 (2022 - 02 - 01)
全文

1-5

A

JP 2006208273 A (ASAHI KASEI HOMES KK) 2006年8月10日 (2006 - 08 - 10)
全文

1-5

A

US 2015378019 A1 (THE UNIVERSITY OF NORTH CAROLINA AT CHAPEL HILL) 2015年12月31日 (2015 - 12 - 31)
全文

1-5

☐ 其余文件在C栏的续页中列出。☒ 见同族专利附件。

* 引用文件的具体类型:

“A” 认为不特别相关的表示了现有技术一般状态的文件

“D” 申请人在国际申请中引证的文件

“E” 在国际申请日的当天或之后公布的在先申请或专利

“L” 可能对优先权要求构成怀疑的文件, 或为确定另一篇引用文件的公布日而引用的或者因其他特殊理由而引用的文件(如具体说明的)

“O” 涉及口头公开、使用、展览或其他方式公开的文件

“P” 公布日先于国际申请日但迟于所要求的优先权日的文件

“T” 在申请日或优先权日之后公布, 与申请不相抵触, 但为了理解发明之理论或原理的在后文件

“X” 特别相关的文件, 单独考虑该文件, 认定要求保护的发明不是新颖的或不具有创造性

“Y” 特别相关的文件, 当该文件与另一篇或者多篇该类文件结合并且这种结合对于本领域技术人员为显而易见时, 要求保护的发明不具有创造性

“&” 同族专利的文件

国际检索实际完成的日期

2023年6月8日

国际检索报告邮寄日期

2023年6月20日

ISA/CN的名称和邮寄地址

中国国家知识产权局
中国北京市海淀区蓟门桥西土城路6号 100088

授权官员

杨莹莹

电话号码 (+86) 010-53961527

国际检索报告
关于同族专利的信息

国际申请号

PCT/CN2022/136882

检索报告引用的专利文件			公布日 (年/月/日)	同族专利			公布日 (年/月/日)
CN	105893719	A	2016年8月24日	无			
CN	114003855	A	2022年2月1日	无			
JP	2006208273	A	2006年8月10日	JP	4363528	B2	2009年11月11日
US	2015378019	A1	2015年12月31日	US	10679407	B2	2020年6月9日